第46卷 第9期
2023年9月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 9
Sep. 2023

雅鲁藏布江山南宽谷流域生态安全格局构建

李洪庆， 杨 瑀， 张俊红

（河海大学公共管理学院，江苏 南京 210098）

摘 要：山南宽谷流域是雅鲁藏布江主要宽谷之一，特殊的地理环境致使该流域既是严重的土地沙化生态脆弱区，也是重要的沿江经济发展带，构建合理的生态安全格局可为未来生态功能提升与经济发展提供依据参考。以山南宽谷流域为研究对象，基于生态系统服务价值和生态敏感性评价，识别出生态源地，利用最小累积阻力值确定了生态安全区并识别生态廊道，构建山南宽谷流域2020年生态安全格局。结果表明：(1) 山南宽谷流域生态源地面积为1089.68 km^2，主要分布于贡嘎县、扎囊县和乃东区内的草场和林区。(2) 在山南宽谷流域内建立了高、较高、中等、较低、低水平生态安全区，分别占流域总面积的24.74%、51.24%、10.31%、5.43%、8.28%，不同生态安全区应采取不同的措施以保证生态环境的安全。(3) 识别出总长4720.08 km的105条生态廊道，与生态源地、生源点和生态安全区共同构成山南宽谷流域生态安全格局。(4) 结合土地利用现状建议山南宽谷流域南岸进行适度产业开发，北岸以生态保护为主，并提出构建“一地一场两区四园”的发展格局。

关 键 词：生态安全格局；山南宽谷流域；最小累积阻力模型；生态系统服务功能；生态敏感性

文章编号：1000-6060(2023)09-1503-11(1503~1513)

生态系统为人类生存提供了丰富的资源禀赋和活动空间，但快速的经济发展和剧烈的人类活动会对生态环境产生一定的负面影响，尤其是生态脆弱区，生态系统自身的稳定性与抵抗力较弱，在推进城镇化建设的过程中极易导致土壤侵蚀、草地退化、土地沙化等生态问题，加剧人地矛盾的同时制约了社会经济的可持续发展。因此，如何实现生态脆弱区人地协调、经济与生态耦合成为研究的热点问题。生态安全格局作为以保持区域内生物流正常运动、维持生物多样性水平、生态系统健康和经济社会可持续发展为目的构建的生态保护区域[1]，可以通过“点-线-面”提升不同生境之间的连接度，有效抵抗生境破碎化带来的影响，为维持生态系统结构和过程的完整性、稳定性提供了有效方案[2]，也可为经济高质量发展和国土空间生态安全规划提供指导，对提升生态环境功能、保障区域可持续发展具有重要意义。

我国对生态安全格局研究开始于20世纪80年代末，起初以生物多样性保护为主要目标，随着经济发展和生态保护矛盾的日益尖锐，自然生态系统和社会经济系统耦合协同成为研究重点[3]。针对中国严峻的人地关系矛盾，学术界对生态安全格局的概念、理论和方法进行了深入探讨，俞孔坚教授及其研究团队首次提出了生态安全格局的理论和方法，并持续在多个尺度多领域进行国土“生态安全格局”研究[4]；傅伯杰团队提出了区域生态安全格局概念，并指出构建区域生态安全格局是保障区域生态系统健康稳定的最佳解决方法[5]，为后续生态安全格局构建及优化提供了理论基础。国家也极其重视生态安全格局构建，2012年环保部开展了“我国国土生态安全格局构建关键技术与保护战略研究”重大专项，极大地推动了生态安全格局研究的发展，同年十八大将生态安全格局列为三大战略格局目标之一[6]；十九大强调“实施重要生态系统保护和修复重大工程，优化生态安全屏障体系，构建生态廊道和生物多样性保护网络，提升生态系统质量

收稿日期：2022-10-23； **修订日期**：2022-11-30
基金项目：国家自然科学基金(41801216)资助
作者简介：李洪庆(1986-)，男，博士，副教授，主要从事土地利用系统和土地生态研究. E-mail: lihongqing163@126.com

和稳定性”，明确了规划要以国家生态安全战略格局为基础；2022年二十大进一步强调基于生态文明理念，优化国土空间，牢筑生态安全格局，凸显了国家生态安全格局构建的重要性。

国家层面的重视极大地推动了该领域的发展，学者对省域[7]、城市[8]、县区[9]、乡镇[10]等不同尺度，山区[11]、流域[12]、林区[13]、耕地[14]等典型客体的生态安全格局构建、演变特征和驱动机制开展了广泛的研究，为我国生态安全格局构建和生态环境质量提升做出了重要贡献。近十年来，生态安全格局领域的研究内容逐步由“生态安全评价、格局的演变、相关要素与格局的耦合协调关系及其驱动机制”转向“生态安全格局的识别与构建，以及格局优化”的应用研究，形成了较为成熟、系统的研究体系[15]；研究方法也从最初的定性分析、静态评估、单一寻优等发展为定量评价、动态模拟、综合研究[16]，建立了基于单因素生态过程叠加形成综合生态安全格局[17]和基于最小累积阻力(MCR)模型建立生态安全格局[18]的2种常用的方法体系。随着研究技术和方法的进步，研究区域逐渐扩展到北部农牧、西北荒漠绿洲、西南石漠岩溶等生态脆弱区，深入探究了干旱区[19]、半干旱区[20]、喀斯特地区[21]、关键流域[22]等重要屏障的生态安全格局和维持机制问题，为优化区域生态安全屏障体系、提升生态系统质量和稳定性提供了有效指导。流域作为典型的复合生态系统，兼具自然、经济、社会多种特征，对人类社会的发展至关重要[23]。学者对太湖流域[12]、黄河流域[24]、黑河流域[25]等生态安全格局构建、调控与优化进行研究，为缓解经济发展和生态保护之间的矛盾、实现高质量发展提供参考。但现阶段对流域的相关研究仍多关注长时间序列自然因素的影响变化，提出的优化意见也局限于生态方面，与经济和空间规划融合度较低。

西藏高原是国家重要的生态安全屏障，山南宽谷流域位于西藏高原的雅鲁藏布江中游，除了具有高原复合侵蚀生态脆弱区地势高寒、气候恶劣、土壤贫瘠、植物生长缓慢、植被覆盖率低、风蚀水蚀冻蚀现象严重等共性生态问题外，强烈的风积、风蚀、干旱等气候原因形成了大面积流动沙丘和季节性沙尘暴，对自然生态系统的稳定和重要的生产生活密集区的人类活动产生了一定的制约[26-28]。近年来，山南宽谷流域人类活动剧烈，贡嘎机场改扩建、拉萨-山南经济一体化、泽(当)贡(嘎)高速、拉(萨)林(芝)铁路等促进山南宽谷流域经济快速发展，随着重大工程和基础设施的完善，生态保护问题逐渐成为宽谷流域经济发展的最大阻碍之一。今后经济发展将更加深入，土地利用活动也愈加频繁，亟需对山南宽谷流域生态系统现状进行评估并构建生态安全格局，指引宽谷流域经济发展格局。因此，本文以雅鲁藏布江中游山南宽谷流域为研究对象，在综合借鉴相关研究方法[29]基础上，基于生态系统服务价值和生态系统敏感性评价识别生态源地，利用MCR模型构建阻力面，构建山南宽谷流域生态安全格局，并结合实际情况提出经济发展格局优化建议。

1 研究区概况

山南宽谷流域(27°08′~29°50′N,90°14′~92°36′E)位于雅鲁藏布江中游，包括山南市乃东区、琼结县、桑日县、扎囊县、贡嘎县5个区县，总面积为10250.47 km²(图1)。该流域属于典型的温带半干旱性高原季风气候，冬长夏短，年平均气温8 ℃左



图1 2020年山南宽谷流域土地利用现状

Fig. 1 Land use status of Shannan Wide Valley Basin in 2020

右，年降水量少，且蒸发强烈，沙尘暴、冰雹等灾害性天气较为频繁。地类主要以草地和林地为主，且存在相当数量沙地、裸地等未利用地。雅鲁藏布江及其支流沿岸水热条件相对较好，适宜居住和耕种，是山南市重要的生产生活密集区和“西藏粮仓”，但宽谷流域河谷、河心滩、河漫滩裸露，强烈的风积和风蚀等自然因素造成两侧山体产生大面积流动沙丘，土地沙化、退化现象明显，严重影响了居民的生产和生活，也限制了经济社会的进一步发展。

2 数据与方法

2.1 数据来源

研究数据包括山南宽谷流域2020年土地利用数据、数字高程数据、植被覆盖数据和社会经济数据等。土地利用数据来源于中科院资源环境科学与数据中心，空间分辨率为30 m，包括耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地6种一级类和25种二级类；数字高程模型（DEM）数据来源于地理空间数据云平台（www.gscloud.cn/），空间分辨率为30 m；植被覆盖数据来源于地理空间数据云（www.gscloud.cn/）下载的Landsat遥感影像，空间分辨率为30 m，并利用ENVI经过图像裁剪、大气校正和辐射定标等处理环节提取本流域植被覆盖值；生态服务价值计算中粮食作物播种面积及产量来源于《山南市统计年鉴》和《全国农产品成本收益资料汇编》。

2.2 研究方法

2.2.1 生态源地的识别 生态源地是生态系统稳定性和服务性的关键，对维护区域生态安全和可持续发展意义重大，是区域范围内需要重点保护的斑块[30]，主要有定性和定量2种识别方法。定性方法通常直接将林地、草地、水域等生态用地作为生态源地或者选取自然保护区、风景名胜区等生态环境较好的区域作为生态源地[31]，但该方法具有较强的主观性，忽略了源地自身的生态环境状况。定量方法主要是基于生态安全评价、生态适宜性评价等，借助GIS技术对评价结果进行空间叠加获得生态源地[32]，该方法获得的生态源地更为科学合理。因此，本文在对山南宽谷流域进行生态服务价值评价和生态敏感性评价的基础上，将生态系统服务价值较高的高值区和极值区，生态敏感性较高的高度敏感区和极度敏感区进行空间叠加，选取面积大于2 km^{2}的斑块作为生态源地。

（1）生态服务价值评价

生态系统服务价值评估是生态环境保护、生态功能区划、生态补偿决策的重要依据和基础[33]。本文采用谢高地提出的当量因子法评估山南宽谷流域2020年生态系统服务价值，计算公式[33]如下：

$$ESV = \sum (VC_i \times A_i) \tag{1}$$

式中：ESV为生态服务价值（元）；VC_i为生态服务价值系数（元·hm^{-2}）；A_i为第i类土地利用类型面积（hm^2）。

将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6类，借鉴相关研究[34-35]，将建设用地生态服务价值系数设定为0，并对相关数据进行系数修正，得到山南宽谷流域单位面积生态系统服务价值系数（表1）。

表1 山南宽谷流域单位面积生态系统服务价值系数

Tab. 1 Coefficient of ecosystem service value per unit area in Shannan Wide Valley Basin

生态系统服务类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
气体调节	4917.36	35951.08	12657.14	0.00	0.00	0.00
气候调节	8752.90	27733.69	14239.29	4523.97	0.00	0.00
水源涵养	5900.83	32869.55	12657.14	200431.65	0.00	295.04
土壤形成与保护	14358.70	40059.77	30851.79	98.35	0.00	196.69
废物处理	16128.95	13455.97	20726.07	178795.26	0.00	98.35
生物多样性保护	6982.65	33485.86	17245.36	24488.46	0.00	3343.81
食物生产	9834.72	1027.17	4746.43	983.47	0.00	98.35
原材料	983.47	26706.51	791.07	98.35	0.00	0.00
娱乐文化	98.35	13147.82	632.86	42682.70	0.00	98.35
总价值	67957.93	224437.43	114547.15	452102.21	0.00	4130.58

(2) 生态敏感性评价

生态敏感性指生态系统对人类活动干扰和自然环境变化的反应程度,表明区域生态环境问题发生的难易程度和可能性[36]。案例区地处高原,环境较为恶劣、沙化问题严重、土壤贫瘠,同时人类活动剧烈,综合考虑自然地理与社会经济因素,选取高程、坡度、土地沙化类型、植被覆盖度、土地利用类型、距水域距离和距道路距离7个指标,评价生态敏感性进行。通过SPSSPRO软件中的层次分析法确定指标权重,利用自然间断法将生态敏感性划分为不敏感、轻度敏感、中度敏感、高度敏感和极度敏感5个等级,并分别赋值为1、3、5、7、9(表2)。计算公式[1]如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n} W_i \times C_i \tag{2}$$

式中:S 为生态敏感性评价综合值;n 为评价因子总数;W_i 为第 i 个评价因子的权重;C_i 为第 i 个评价因子的敏感性评价标准化值。

表2 山南宽谷流域生态敏感性评价指标体系

Tab. 2 Evaluation index system of ecological sensitivity in Shannan Wide Valley Basin

准则层	因子	权重	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极度敏感
自然环境背景	高程/km	0.06	≤4.0	4.0~4.5	4.5~5.0	5.0~5.5	>5.5
	坡度/(°)	0.18	≤10	10~20	20~30	30~50	>50
	土地沙化类型	0.14	–	–	流动沙地	半固定沙地	固定沙地
	植被覆盖度/%	0.19	≤35	35~65	65~76	76~89	>89
人类活动干扰	土地利用类型	0.17	建设用地	未利用地	耕地、草地	林地	水域
	距水域距离/km	0.15	≥20	15~20	10~15	5~10	≤5
	距道路距离/km	0.11	≤7	7~16	16~27	27~40	>40

2.2.2 **阻力面构建** 结合实际情况和数据可获得性,参考相关研究成果[37],选择土地利用类型、植被覆盖度、坡度作为阻力因子,使用层次分析法确定各指标权重,叠加生成阻力面。阻力面影响因子详见表3。

表3 阻力面因子及阻力值

Tab. 3 Values and influence factors of resistance surface

阻力面因子	权重	分类	阻力值
土地利用类型	0.61	林地、草地	10
		水域	30
		耕地	50
		建设用地	70
		未利用地	90
植被覆盖度	0.22	[0.00, 0.35)	90
		[0.35, 0.65)	70
		[0.65, 0.76)	50
		[0.76, 0.89)	30
		[0.89, 1.00]	10
坡度/(°)	0.17	[0, 10)	10
		[10, 20)	30
		[20, 30)	50
		[30, 50)	70
		[50, 75]	90

2.2.3 **生态廊道的提取** 基于Knaapen等[38]提出的最小累积阻力(Minimum Cumulative Resistance,MCR)模型识别生态源点之间的最小耗费距离。其计算公式[23]如下:

$$\mathrm{MCR} = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} R_i \tag{3}$$

式中:MCR 为最小累积阻力值;$f_{\min}$ 为最小累积阻力与生态过程的正相关关系;D_{ij} 为物种从源 j 到景观单元 i 的空间距离;R_i 为景观单元 i 的阻力值。

3 结果与分析

3.1 生态源地识别

3.1.1 **生态系统服务价值评价分析** 山南宽谷流域生态系统服务价值总体较高,具有明显的空间差异性(图2a)。极值区面积最大,为4160.97 km²,占研究区总面积的41.01%;中值区面积最小,为549.72 km²,占研究区总面积的5.42%;高值区和极值区面积超过区域总面积的一半,占区域总面积的53.95%。极值区主要分布于雅鲁藏布江南岸的草地,土地较为平坦,生态系统服务价值较高;高值区和中值区以雅鲁藏布江及其北岸林地为主;一般值区和低值区则

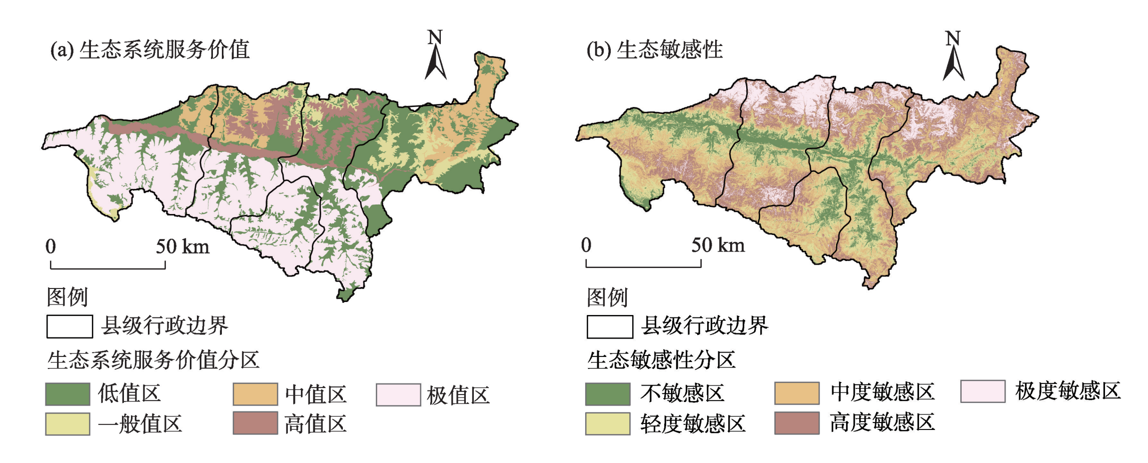


图2 生态系统服务价值和生态敏感性空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ecosystem service value and ecological sensitivity

分散分布于山南宽谷流域内，由部分退化耕地、建设用地和高山、沙地等未利用地构成，土壤条件较差。

3.1.2 生态敏感性评价分析 山南宽谷流域生态敏感性整体较高(图2b)，处于中度及以上敏感的区域占半数以上，其中中度敏感区最多，面积为2895.95 km^2，占总面积的28.54%；高度敏感区和极度敏感区面积也相对较大，为3551.45 km^2，占总面积的35.00%。空间分布方面，不敏感区和轻度敏感区集中在雅鲁藏布江及其沿线的耕地、建设用地；中度敏感区、高度敏感区和极度敏感区分散于流域内，由林地、草地等生态用地构成。

3.1.3 生态源地识别 通过ArcGIS中的空间分析功能将生态系统服务价值中的高值区和极值区以及生态敏感性中的高度敏感区和极度敏感区叠加，筛选面积大于2 km^{2}的斑块作为山南宽谷流域生态源地(图3)。研究结果表明，生态源地总面积为1089.68 km^2，占总面积的10.74%；空间分布较为零散，主要分布于贡嘎县、扎囊县和乃东区内的草场和林区，紧邻河谷农业带和高山。这些区域人类活动较少，生态系统服务价值较高，是流域内生态环境质量较好的林地、草地所在区域。

3.2 阻力面构建

根据表3的阻力因子，计算得到山南宽谷流域最小累积阻力面(图4)。研究结果表明：山南宽谷流域生态源地扩张最小累积阻力值介于0~86.6之间，整体呈现南北高中间低、东高西低的趋势。高阻力斑块分布较为分散，以河谷农业带、高山及未利用地为主，相较而言集中在研究区范围的东部，尤其是桑日县、乃东区、琼结县。

3.3 生态安全格局构建

选取生态源地中心点作为生源点，借助MCR模型识别生态廊道。以阻力面为基础，利用自然间断法进行分级，得到生态安全类型区，将识别的生态节点、生态廊道、重要廊道进行叠加显示，得到山南宽谷流域生态安全格局分布图(图5)。

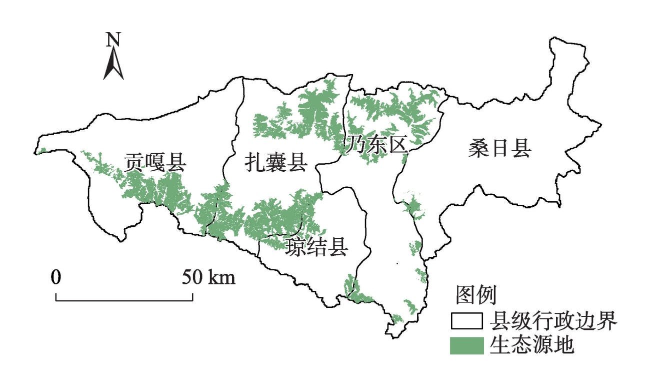


图3 生态源地空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of ecological sources

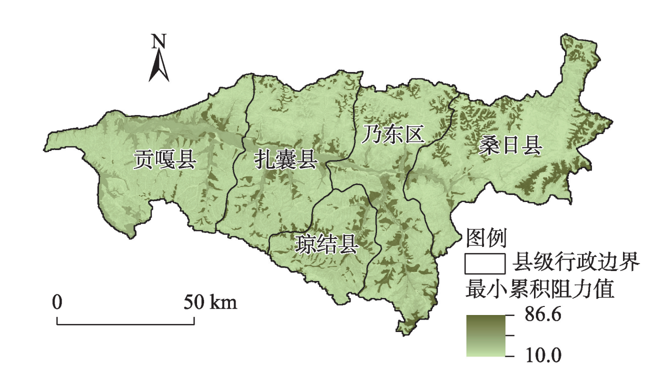


图4 生态阻力面空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of ecological resistance surface

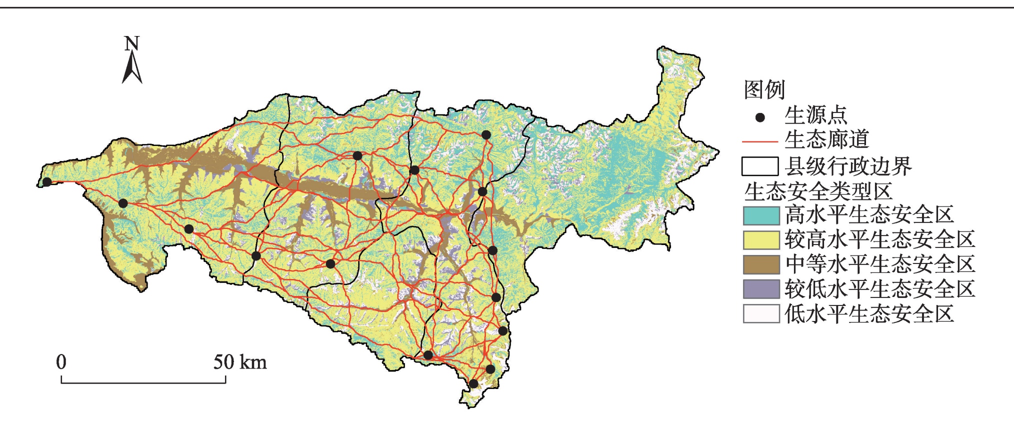


图5 生态安全格局分布

Fig. 5 Distribution of ecological security pattern

由图5可知,高水平生态安全区面积为2510.52 km²,占研究区总面积的24.74%,主要集聚北部,南部分布分散。较高水平生态安全区面积为5200.35 km²,占研究区总面积的51.24%,是面积最大的区域,环绕高水平生态安全区分布,雅鲁藏布江以南区域(简称南岸)水热条件较好,土地沙化影响相对雅鲁藏布江以北区域(简称北岸)轻微,故较高水平生态安全区在南部大面积显现。中等水平生态安全区面积为1046.39 km²,面积占比为10.31%,主要呈带状分布在河流及其周边沿线。较低水平生态安全区面积仅为551.56 km²,低水平生态安全区面积为840.26 km²,面积占比分别为5.43%、8.28%,以高山、河谷农业带及其周围退化土地为主。

高水平生态安全区具有土地开发利用程度较小、生态环境质量好、生态安全水平高的特点,该区域要遵循"两山理论",积极采取措施继续保护天然草地和林地资源,以高水平生态安全区为据点,不断向外扩张,增加安全水平。较高水平生态安全区分布在水域、河谷农业带和高山周围,建议植树种草、涵养水土,防止退化土地的进一步扩张;引进优良草种的同时推行轮牧、休牧政策,最大程度保护草地。中等水平生态安全区以水域为主,做好水源涵养和保护工作,在河谷种植防风林,阻止流动沙地外扩,并通过草地网格法等措施治理已有沙地。较低水平生态安全区涉及较多耕地和退化土地,需要优化耕地布局,提高耕地的利用效率,将部分肥力较低的土地退耕还林、还草,发展节水农业。低水平生态安全区围绕较低水平生态安全区分布,以退化土地和难利用的山地、裸岩石砾地为主,应推进环境综合整治系统工程,保持水土,采取严格的控制措施,禁止土地开发,并针对沙地、裸地、水土流失地等不同退化土地采取相应措施进行整治,提高生态系统的稳定性。

生态廊道是连接生态源地的桥梁,共识别出生态廊道105条,总长4720.08 km。从空间分布分析,生态廊道密集分布于乃东区、扎囊县、琼结县3个区县,桑日县和贡嘎县生态廊道较少,不利于物质和能量的交换和流通,尤其是桑日县内难以利用的土地较多,需要加强生态环境整治,扩大草地和林地的面积,涵养水土以提高生态环境质量。

3.4 经济发展格局优化

通过生态安全评价可知,山南宽谷流域内以雅鲁藏布江为界,雅鲁藏布江北岸海拔较高,自然本底条件较差,裸地等难利用和不可利用地较多,经济开发难度较大;雅鲁藏布江南岸气候条件相对较好,自然本底条件较优,生态安全等级较高,适宜人类居住和经济开发。因此,山南宽谷流域北岸的经济发展应更大程度顺应当地的自然地理条件,尽可能减少人类干扰,让土地自然修复的同时避免其他土地的退化;南岸资源条件相对较好,环境稳定性较高,可在环境保护的基础上进行适度开发。将山南宽谷流域2020年土地利用现状(图1)与生态安全格局分布(图5)叠加,获得生态安全区的土地利用类型(图6)。结合山南宽谷流域现有产业和资源条件,在图6的基础上提出构建"一地一场两区四园"的经济发展格局(图7)。

(1)"一地"指生态观光农业基地。贡嘎县至乃东区河谷地带是西藏历史上最早的农业区之一,土壤肥沃、水源丰富、日照充足且昼夜温差大,适宜种

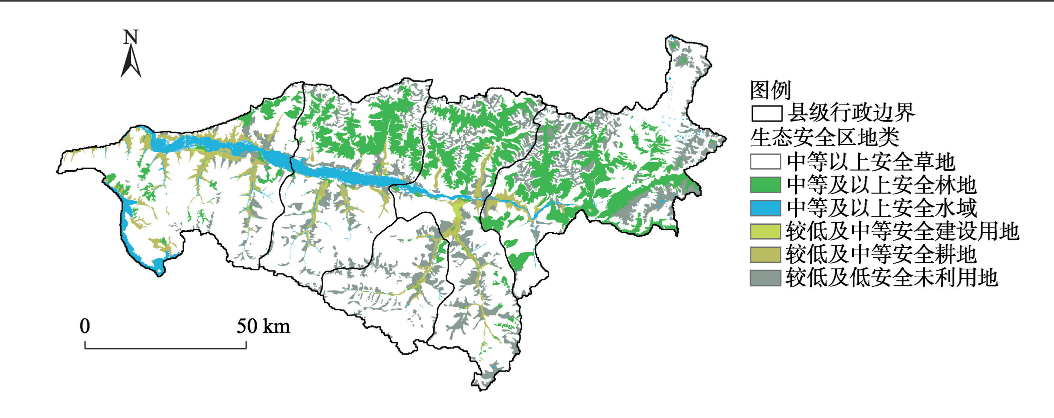


图6 生态安全区土地利用类型

Fig. 6 Land use types in ecological safety zone

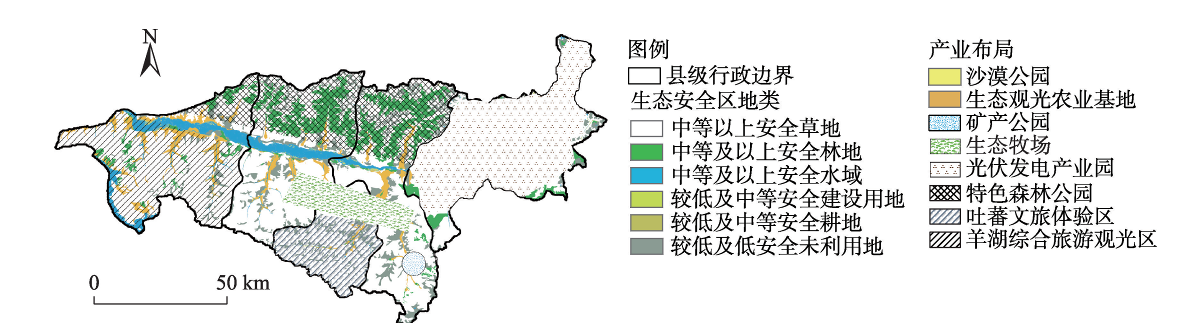


图7 土地利用优化分区

Fig. 7 Land use optimization zoning

植鲜花和苗圃，但随着耕地的过度使用，部分耕地肥力不断下降，甚至退化为难以利用地，严重影响了相关区域的生态安全。因此，建议将较低安全耕地、中等安全耕地及附近的低安全未利用地、较低安全未利用地划为生态观光农业基地，加强耕作技术和制度的优化，强化耕地基础设施建设，通过生物措施和工程措施相结合，在保证退化土地不增加的同时将未利用地转化为草地等生态用地，增强相关区域生态稳定性，并提高生态安全等级。

(2)"一场"指生态牧场。山南宽谷具有充足的优质草地资源，传统的畜牧业经济效益较低，牧民容易在利益的驱动下过度放牧导致草地退化，威胁草地生态系统的稳定，形成高安全草地、较高安全草地和中等安全草地混杂的情况。因此，将扎囊县、琼结县、乃东区3个区县的高安全草地和较高安全草地统筹为一个牧场，成立经营合作社，对牧场进行统一管理，分区放牧，并将传统放牧业与观光旅游业相结合，开发放牧体验、喂养体验等牧场游玩体验项目，在增加牧民收益的同时保证草地的适度利用。

(3)"两区"指贡嘎县的羊湖综合旅游观光区和琼结县的吐蕃文旅体验区。贡嘎县西南部的羊卓雍措是我国著名景点，但羊湖周围的基础设施建设尚不充足，且附近耕地经过过度开垦已经出现退化现象，未来极易对羊湖产生不良影响。因此，拟打造以羊湖为核心覆盖贡嘎县绝大部分区域的综合旅游观光区，限制包括垦殖、放牧等一切土地开发利用活动，保障羊湖水域生态安全的同时拉动贡嘎县经济的增长。琼结县历史丰富，景点分布较为集中，且域内有较多的影响生态安全的未利用地，不适宜进行大规模的土地开发活动，因此建议以吐蕃文化为卖点、藏王墓、松赞干布墓等景点为核心，打造吐蕃文旅体验区，发展旅游经济。

(4)"四园"指沙漠公园、特色森林公园、光伏发电产业源和矿产公园。雅鲁藏布江沿岸由于气候和人为原因，部分土地退化为沙地，治理难度较大、效益较低。因此，建议在部分顽固性沙地上建立沙漠公园，开发滑沙场等游乐设施，挖掘沙地经济价值的同时控制沙地面积的进一步扩张，并以经济反哺生态。乃东区、扎囊县北部海拔较高，以高山、林

地为主，气候条件较差，建议加快完成高海拔地区生态移民搬迁项目，在现有地类地貌基础上，以高原物种群落和原生态森林为特色建立森林公园，并对部分退化地区采取严格的限制性措施，以自然恢复为主，辅之以生态整治。桑日县是我国太阳日照时数最多的地区之一，太阳能资源极为丰富，可建立绿色光伏发电产业园，进行环境整治的同时将太阳能资源转化为经济利益。乃东区南部是山南市政府所在地，建设用地密集，与此同时矿产资源丰富，矿业开发活动较多，导致乃东区土地退化严重，因此要严格控制建设用地的审批，并在矿产开发的废弃土地上建立矿产公园，增植树木、绿草，修复受损土地，增加绿地面积。

通过羊湖综合旅游观光区、生态农业观光基地、生态牧场、吐蕃文旅体验区、沙漠公园、矿产公园、光伏发电产业园和森林公园将贡嘎县、扎囊县、乃东区等5个区县相连接，打造集观光、休闲、体验为一体的山南宽谷流域特色高原生态旅游业，将传统的一二产业与第三产业相结合，在提高经济收益的同时保护、修复生态环境，实现山南宽谷流域经济和生态的协调发展。

4 讨论

良好的生态环境是高质量发展的基础，构建流域生态安全格局是实现区域稳定协调发展的重要手段[23]。雅鲁藏布江流域作为我国重要的生态屏障和典型的生态脆弱区之一，对其进行生态安全评价和格局构建有利于实现经济的绿色发展。但现阶段，对于流域生态安全的研究多集中于太湖、黄河等流域，进行生态安全评价时也更关注长时间序列自然因素的影响变化，导致生态安全格局与经济和空间规划融合度较低[12,24,25]。因此，本文以雅鲁藏布江中游流域山南宽谷段为研究对象，通过对其进行生态安全评价和生态安全格局构建，提出具有针对性的优化和发展建议，为山南宽谷流域未来经济布局提供了一定的指导，以期实现经济绿色协调高效发展。

但在对山南宽谷流域进行生态安全评价和生态安全格局构建的过程中，仍存在一些不足。未对山南宽谷流域的生态状况进行多年分析，只对其进行了2020年生态安全现状进行了评价，在此基础上构建了生态安全格局；选取高程、坡度、沙化类型、距道路距离等因子来反映山南宽谷流域海拔较高、沙化现象严重和经济快速发展等特点，但由于数据可得性等问题，山南宽谷流域经济快速发展区的特征并未充分体现；在识别生态源地时，将面积小于2 km^2的源地剔除，忽略了面积小但生态价值较高的区域，这一举措对后续的生态安全格局构建也有一定的影响。今后将持续收集山南宽谷流域的相关资料，补充完善指标体系，更好地反映山南宽谷流域经济快速的区域特征，并对其展开多年分析，构建出更加科学合理的生态安全格局，为山南宽谷流域经济高质量发展提供借鉴。

5 结论

通过对山南宽谷流域生态服务价值和生态敏感性进行评价，分析山南宽谷流域生态安全现状并构建生态安全格局，结合当地实际提出优化和发展建议，结论如下：

（1）山南宽谷流域生态系统服务价值较高，生态敏感性也处于相对较高的水平，其中生态系统服务价值评价高值区和极值区占县域面积的53.95%；生态敏感性评价中高度敏感区和极度敏感区占县域面积的35.00%。基于此，在山南宽谷识别出生态源地1089.68 km^2，占研究区总面积的10.74%，主要分布在贡嘎县、扎囊县和乃东区，紧邻高山和河谷农业带。

（2）基于MCR模型构建生态安全最小累积阻力面，并得到山南宽谷流域生态安全格局缓冲区，其中高水平生态安全区面积为2510.52 km^2，占研究区总面积的24.74%；较高水平生态安全区面积为5200.35 km^2，占研究区总面积的51.24%；中等水平生态安全区面积为1046.39 km^2，占研究区总面积的10.31%；较低水平生态安全区面积为551.56 km^2，占研究区总面积的5.43%；低水平生态安全区面积为840.26 km^2，占研究区总面积的8.28%。针对不同水平生态安全区应采取不同的措施以保障宽谷生态安全。

（3）识别出生态廊道105条，总长4720.08 km，集中分布于乃东区、琼结县和扎囊县，桑日县内几乎没有廊道，亟需采取相应措施改善生态环境质量，增设廊道。

（4）结合山南宽谷土地利用现状和生态安全格局，提出"一地一场两区四园"的经济发展格局。山南宽谷流域北岸应限制开发，根据土地利用现状开发为各类公园，稳定生态系统；南岸可适度开发，根据各区县不同资源禀赋，开发藏族文化旅游、高原农牧业等特色产业。

参考文献(References)

[1] 张慧, 邱凯玉, 王宇瑶, 等. 农业主产区生态安全格局构建——以克东县为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 274-282. [Zhang Hui, Qiu Kaiyu, Wang Yuyao, et al. Construction of land ecological security pattern in main agricultural production areas: Taking Kedong County as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6): 274-282.]

[2] Dong J Q, Peng J, Liu Y X, et al. Integrating spatial continuous wavelet transform and kernel density estimation to identify ecological corridors in megacities[J]. Landscape and Urban Planning, 2020, 199: 103815, doi: 10.1016/j.landurbplan.2020.103815.

[3] 陈艺妍, 覃林. 区域生态安全格局规划研究的进展与展望[J]. 科技通报, 2022, 38(5): 1-8. [Chen Yiyan, Qin Lin. Progress and prospect in regional ecological security pattern planning[J]. Bulletin of Science and Technology, 2022, 38(5): 1-8.]

[4] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 10-17. [Yu Kongjian. Landscape ecological security patterns in biological conservation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 10-17.]

[5] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 等. 区域生态安全格局: 概念与理论基础[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768. [Ma Keming, Fu Bojie, Li Xiaoya, et al. The regional pattern for ecological security (RPES): The concept and theoretical basis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 761-768.]

[6] 樊杰. 我国国土空间开发保护格局优化配置理论创新与"十三五"规划的应对策略[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(1): 1-12. [Fan Jie. Theoretical innovation in optimization of protection and development of China's territorial space and coping strategy of 13th Five-Year Plan[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(1): 1-12.]

[7] Feng B O, Yue W Z, Xia H X. Evaluation of ecological conservation red line from the perspective of ecological security pattern: Taking Zhejiang Province, China as an example[J]. The Journal of Applied Ecology, 2022, 33(9): 2466-2474.

[8] Cao X F, Liu Z S, Li Z J, et al. Integrating the ecological security pattern and the PLUS model to assess the effects of regional ecological restoration: A case study of Hefei City, Anhui Province[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(11): 6640-6640.

[9] 李瑶, 李久林, 储金龙. 基于电路理论的金寨县生态安全格局构建[J]. 生态科学, 2022, 41(2): 227-236. [Li Yao, Li Jiulin, Chu Jinlong. Construction of ecological security pattern based on circuit theory in Jinzhai County[J]. Ecological Science, 2022, 41(2): 227-236.]

[10] 鄢广奎, 赵兵. 丘陵区生态安全格局构建分析——以广安市小井乡为例[J]. 四川环境, 2019, 38(4): 105-112. [Yan Guangkui, Zhao Bing. Construction of ecological security patterns in hilly areas: Taking Xiaojing Township of Guang'an City as an example [J]. Sichuan Environment, 2019, 38(4): 105-112.]

[11] Zhang C X, Jia C, Gao H G, et al. Ecological security pattern construction in hilly areas based on SPCA and MCR: A case study of Nanchong City, China[J]. Sustainability, 2022, 14(18): 11368-11368.

[12] 王雪然, 万荣荣, 潘佩佩. 太湖流域生态安全格局构建与调控——基于空间形态学-最小累积阻力模型[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1968-1980. [Wang Xueran, Wan Rongrong, Pan Peipei. Construction and adjustment of ecological security pattern based on MSPA-MCR model in Taihu Lake Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1968-1980.]

[13] 李伊彤, 荣丽华, 李文龙, 等. 生态重要性视角下东北林区县域生态安全格局研究——以呼伦贝尔市阿荣旗为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1615-1625. [Li Yitong, Rong Lihua, Li Wenlong, et al. Ecological security pattern at county level in northeast forest area of China from the perspective of ecological importance: A case of Arun Banner in Hulun Buir City[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1615-1625.]

[14] 蔡汉, 朱权, 罗云建, 等. 快速城镇化地区耕地景观生态安全格局演变特征及其驱动机制[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(5): 181-188. [Cai Han, Zhu Quan, Luo Yunjian, et al. Evolution characteristics and driving mechanisms of cultivated landscape eco-security patterns in rapid urbanization areas[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(5): 181-188.]

[15] 谭倩倩. 成都市密集建成区土地利用变化与生态安全格局研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021. [Tan Qianqian. Study on land use change and ecological security pattern in densely built-up areas of Chengdu[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.]

[16] 易浪, 孙颖, 尹少华, 等. 生态安全格局构建: 概念、框架与展望[J]. 生态环境学报, 2022, 31(4): 845-856. [Yi Lang, Sun Ying, Yin Shaohua, et al. Construction of ecological security pattern: Concept, framework and prospect[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(4): 845-856.]

[17] 田健, 黄晶涛, 曾穗平. 基于复合生态平衡的城市边缘区生态安全格局重构——以铜陵东湖地区为例[J]. 中国园林, 2019, 35(2): 92-97. [Tian Jian, Huang Jingtao, Zeng Suiping. Research on the reconstruction of ecological security pattern in urban fringe based on the compound ecological balance: A case study of Donghu District in Tongling City[J]. Chinese Landscape Architecture, 2019, 35(2): 92-97.]

[18] Zhou S K, Song Y H, Li Y J, et al. Construction of ecological secu-

rity pattern for plateau lake based on MSPA-MCR model: A case study of Dianchi Lake area[J]. Sustainability, 2022, 14(21): 14532-14532.

[19] 王佳雪, 刘春芳, 张世虎. 北方防沙带典型县域生态安全格局研究[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 3989-3997. [Wang Jiaxue, Liu Chunfang, Zhang Shihu. Ecological security pattern of typical counties in northern sand prevention belts[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 3989-3997.]

[20] 王让虎, 李晓燕, 张树文, 等. 东北农牧交错带景观生态安全格局构建及预警研究——以吉林省通榆县为例[J]. 地理与地理信息科学, 2014, 30(2): 111-115, 127. [Wang Ranghu, Li Xiaoyan, Zhang Shuwen, et al. Research for landscape ecological security pattern and early warning in farming-pastoral zone of northeast China: A case study of Tongyu County in Jilin Province[J]. Geography and Geo-information Science, 2014, 30(2): 111-115, 127.]

[21] Yang Y P, Chen J J, Huang R J, et al. Construction of ecological security pattern based on the importance of ecological protection: A case study of Guangxi, a karst region in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(9): 5699, doi: 10.3390/ijerph19095699.

[22] 赵诚诚, 潘竟虎. 基于供需视角的黄河流域甘肃段生态安全格局识别与优化[J]. 生态学报, 2022, 42(17): 6973-6984. [Zhao Chengcheng, Pan Jinghu. Ecological safety pattern identification and optimization based on the ecological supply and demand in Gansu section of the Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17): 6973-6984.]

[23] 杨振民, 刘新平. 新疆阿克苏河流域生态承载力监测及安全格局构建[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1489-1499. [Yang Zhenmin, Liu Xinping. Ecological carrying capacity monitoring and security pattern construction in the Aksu River Basin, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1489-1499.]

[24] 冯琰玮, 甄江红. 黄河流域内蒙古段生态安全格局优化研究[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(10): 129-138. [Feng Yanwei, Zhen Jianghong. Eco-spatial security optimization in watershed of the Yellow River in Inner Mongnolia[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(10): 129-138.]

[25] 毛诚瑞, 代力民, 齐麟, 等. 基于生态系统服务的流域生态安全格局构建——以辽宁省辽河流域为例[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6486-6494. [Mao Chengrui, Dai Limin, Qi Lin, et al. Constructing ecological security pattern based on ecosystem services: A case study in Liaohe River Basin, Liaoning Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6486-6494.]

[26] 张信宝. 对西藏"一江两河"河谷地区风沙灾害的一些粗浅认识和治理工作建议[J]. 山地学报, 2020, 38(5): 643-646. [Zhang Xinbao. A updated understanding of wind-sand disaster in the valley area of "one river and two tributaries" in Tibet of China and suggestions for control work[J]. Mountain Research, 2020, 38(5): 643-646.]

[27] 李海东, 沈渭寿, 赵卫, 等. 西藏高寒河谷沙地生态恢复与安全屏障建设的对策建议[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(12): 160-163, 174. [Li Haidong, Shen Weishou, Zhao Wei, et al. Countermeasures for ecological restoration of aeolian sandy land and construction of ecological security barrier in the alpine valley of Tibet, China[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(12): 160-163, 174.]

[28] 唐永发, 熊东红, 张宝军, 等. 雅江河谷中段典型防沙治沙生态工程对沙地持水性能的改良效应[J]. 山地学报, 2021, 39(4): 461-472. [Tang Yongfa, Xiong Donghong, Zhang Baojun, et al. Water holding capacity of aeolian sandy land impacted by different typical vegetation ecological projects in the middle reach of the Yarlung Zangbo River Valley, Tibet, China[J]. Mountain Research, 2021, 39(4): 461-472.]

[29] 朱陇强, 郭泽呈, 肖敏, 等. 半干旱区县域生态安全格局构建——以临洮县为例[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5799-5811. [Zhu Longqiang, Guo Zechen, Xiao Min, et al. Construction of county ecological security pattern in semi-arid area: A case study of Lintao County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5799-5811.]

[30] 和娟, 师学义, 付扬军. 基于生态系统服务的汾河源头区域生态安全格局优化[J]. 自然资源学报, 2020, 35(4): 814-825. [He Juan, Shi Xueyi, Fu Yangjun. Optimization of ecological security pattern in the source area of Fenhe River Basin based on ecosystem services[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(4): 814-825.]

[31] 王玉青, 李恒凯, 武镇邦, 等. 东江源区生态安全格局演变分析与评价[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(14): 5548-5554. [Wang Yuqing, Li Hengkai, Wu Zhenbang, et al. Analysis and evaluation on evolution of ecological security pattern in headwaters region of the Dongjiang River[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(14): 5548-5554.]

[32] Yang R L, Bai Z K, Shi Z Y. Linking morphological spatial pattern analysis and circuit theory to identify ecological security pattern in the Loess Plateau: Taking Shuozhou City as an example[J]. Land, 2021, 10(9): 907-907.

[33] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254.]

[34] 李政, 丁忆, 王亚林, 等. 基于最小累积阻力模型的山地石漠化地区生态安全格局构建: 以重庆市南川区为例[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(8): 1046-1054. [Li Zheng, Ding Yi, Wang Yalin, et al. Construction of ecological security pattern in mountain rocky desertification area based on MCR model: A case study of Nanchuan, Chongqing[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(8): 1046-1054.]

[35] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196. [Xie Gaodi, Lu Chunxia,

Leng Yunfa, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189−196.]

[36] 方臣, 匡华, 贾琦琪, 等. 基于生态系统服务重要性和生态敏感性的武汉市生态安全格局评价[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(5): 1446−1454. [Fang Chen, Kuang Hua, Jia Qiqi, et al. Evaluation of ecological security pattern in Wuhan City based on the importance of ecosystem services and ecological sensitivity[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(5): 1446−1454.]

[37] 王浩, 马星, 杜勇. 基于生态系统服务重要性和生态敏感性的广东省生态安全格局构建[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1705−1715. [Wang Hao, Ma Xing, Du Yong. Constructing ecological security patterns based on ecological service importance and ecological sensitivity in Guangdong Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1705−1715.]

[38] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning[J]. Landscape and Urban Planning, 1992, 23(1): 1−16.

[39] 杨帅琦, 何文, 王金叶, 等. 基于景观生态风险评估的漓江流域生态安全格局构建[J/OL]. 中国环境科学. [2022−11−26]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2201.X.20221123.0808.002.html. [Yang Shuaiqi, He Wen, Wang Jinye, et al. Ecological security pattern construction in Lijiang River Basin based on landscape ecological risk assessment[J/OL]. China Environmental Science. [2022−11−26]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2201.X.20221123.0808.002.html.]

Construction of ecological security pattern in Shannan Wide Valley Basin of Yarlung Zangbo River

LI Hongqing, YANG Yu, ZHANG Junhong

(School of Public Administration, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract: Shannan Wide Valley Basin is one of the prime valleys of the Yarlung Zangbo River of China. The geographical environment of the basin makes it vulnerable to land desertification and ecological degradation, while also making it an important belt of economic development along the river. Ecological security patterns can provide a reference for future improvements in ecological functions and economic development. Based on the evaluation of ecosystem services and ecological sensitivity, the ecological source areas were identified. The minimum cumulative resistance value was used to determine ecological security zones and ecological corridors, and the ecological security pattern of the Shannan Wide Valley Basin was constructed for 2020. The results showed that: (1) The ecological source area of the basin was found to be 1089.68 km^2, with distribution mainly occurring in grassland and forest areas of Gonggar County, Zhanang County, and Nedong District. (2) Zones of maximum, high, medium, low, and minimum ecological security were established, accounting for 24.74%, 51.24%, 10.31%, 5.43%, and 8.28% of the total basin area, respectively. To ensure ecological security, different measures should be applied at each level of the ecological security zone. (3) The constructed ecological security pattern comprised 105 ecological corridors with a total length of 4720.08 km, together with various ecological source areas, ecological source points, and ecological security areas. (4) In addition to the current land use situation in Shannan Wide Valley, moderate industrial development should take place on the southern banks of the river, while ecological protection measures should be the focus for the northern banks. Further, the “one land, one field, two districts, and four parks” development pattern should be followed.

Key words: ecological security pattern; Shannan Wide Valley Basin; minimum cumulative resistance model; ecosystem service function; ecological sensitivity